

「秋田大学研究者海外派遣事業」帰国報告書

平成27年4月23日

所属・職名：工学資源学研究科・助教

氏名：長谷川崇

派遣期間：平成26年3月1日～平成26年8月31日（183日）

派遣研究機関名：英文：University of Manchester, School of Computer Science, Nano Engineering & Storage Technology Research Group

：和文：マンチェスター大学, コンピューターサイエンス学部, ナノエンジニアリング&ストレージテクノロジーリサーチグループ

研究課題：磁性ナノドット配列及び磁気微粒子の合成と磁気応用

○研究概要（2000字程度）

1. 研究の背景

（1）記録媒体の高密度化とその社会的意義

近年の情報化社会の進展に伴い、磁気記録媒体（HDD）の大容量・高記録密度化が急務となっている。媒体の記録密度を増大させるには、磁性薄膜をナノスケールに微細化するのが有効である。記録密度が向上すれば、その分だけデータセンター等で使用されている莫大な数のHDDの数的削減に繋がり、将来的には省電力・省資源の効果も期待される。

（2）材料開発と微細加工法の開発

強磁性体の微細化を進めると、磁化が熱エネルギーの影響で不安定化する。これは記録ビットの熱揺らぎ問題を引き起こす。この問題を解決するには、磁気異方性（Ku）が高い材料が有効であり、 $L1_0$ -FePt系規則合金は、現行媒体材料の10倍以上の非常に高いKuを有することから、次世代HDDの有力な候補材料として注目されている。筆者はこれまでに、 $L1_0$ -FePtのFeをMnで置換した場合に、室温で強磁性-非磁性相変化が生じることを明らかにした。また本特性を利用することで、筆者が特許出願済みのフラット・パターンニング法による微細加工が可能となる。当手法は、イオン照射を用いて磁性薄膜の組成や結晶構造を部分的にナノスケールで変調させて、磁気特性のみを微細化する。本手法の最大の利点は物理的な切削工程が無いことであり、これによりナノ磁性体（記録ビット）の磁気特性の劣化を最小限に留め、より微細で精密な加工が可能になると考える。また従来技術と比べて主要な製造工程数が半減するので、企業における将来の設備投資の軽減と歩留りの向上も期待される。

2. 研究目的

$L1_0$ -FeMnPt 規則合金薄膜は室温で磁化が無くいわゆる非磁性を示すが、相の特定には至っていない。そこで本事業では、高温から極低温までの物性評価とナノ構造体の作製・評価を得意とする留学先研究室において、当材料の磁化の温度依存性を精密に測定することで磁性スピンの配列・秩序を評価し、磁気相図を決定する。次いで本特性を利用したナノ磁性体の作製を行い、磁区観察と磁化曲線の角度依存性の測定を行うことで、ナノ磁性体の磁化過程を解明する。

3. 研究成果

(1) $L1_0$ -FeMnPt 規則合金薄膜の磁気相図の決定

図 1 (a) は、 $L1_0$ -($Fe_{1-x}Mn_x$)Pt 薄膜の Mn 組成が $x=0.58$ における磁化の温度変化測定の結果である。サンプルの磁化容易軸に対して磁場を 1kOe 印加しながら、高温側から低温側に向けて測定を行った。冷却過程において、磁化は初め上昇し、360K 付近（相転移温度 T_0 ）で最大値をとり、その後減少している。これは次のように解釈される。高温側では、磁性スピンの熱エネルギーに打ち勝つことができず、配列が無秩序となり磁化は低い値を示すが、 T_0 付近で秩序性を獲得することで磁化は上昇し、その後冷却により完全な反平行スピン配列へと変化することで磁化は再び減少する。このことから、高温側の非磁性相は常磁性相 (PM)、低温側は反強磁性相 (AF) であると考えられる。図 1 (b) は、 x に対して T_0 とキュリー温度 T_c (強磁性と PM の相転移温度) をプロットした磁気相図である。 $0 \leq x \leq 0.54$ では強磁性 (FM) -PM 相転移、 $0.52 \leq x \leq 0.60$ では AF-FM-PM または AF-PM 相転移を示すことがわかる。

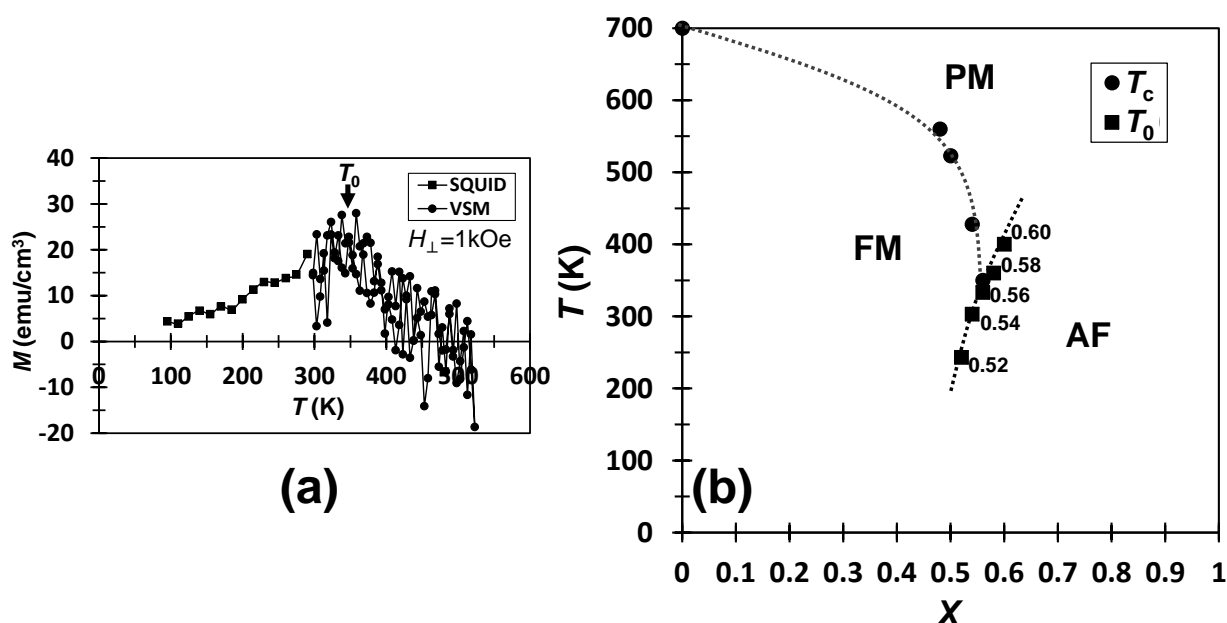


図 1. (a) $x=0.58$ での磁化 (M) の温度 (T) 依存性. (b) $[001]$ 垂直配向した $L1_0$ -($Fe_{1-x}Mn_x$)Pt 薄膜の磁気相図.

(2) ナノ磁性体の磁化過程の解明

FM の $L1_0$ -FeMnPt 薄膜上に直径 100nm のマスク（ポジ型レジスト ZEP520A）を配置し、その上から Mn イオンを照射して部分的に PM 化することで、ナノ磁性体の作製を行った。マスク作製には電子線描画装置、イオン照射には加速器を伴うイオン注入機を用いた。図 2 (a) は磁気力顕微鏡 (MFM) による磁区観察の結果である。MFM では FM 領域のみが明暗コントラストを示す。図を見ると直径 100nm の円形領域が明コントラストで、その周囲が中間コントラストを有することから、FM ナノ磁性体が PM 相で囲まれていることがわかる。消磁状態では単一の明暗コントラストを有するナノ磁性体がランダムに観察されたことから、個々のナノ磁性体は単磁区構造を形成し、磁氣的に孤立していることが示唆された。図 2 (b) は、数百個のナノ磁性体の平均的な磁化曲線（室温）である。磁化容易軸と磁化困難軸のプロットを高磁場側へ外挿して求めた一軸磁気異方性定数 (K_u) は $7.6 \times 10^6 \text{ emu/cm}^3$ であり、現行媒体の 3 倍以上の値が得られた。図 2 (c) は、任意角度 (θ) で測定された磁化曲線から得られた磁化反転磁場 ($H_r(\theta)$) を、 0° での反転磁場 ($H_r(0)$) で規格化した $H_r(\theta)/H_r(0)$ の θ 依存性である。微細加工前の薄膜は $1/\cos\theta$ に近い関数でフィッティングされるのに対し、ナノ磁性体ではストナー・ウォルフアス (S-W) モデルに類似する傾向がある。これより薄膜の磁化過程は磁壁移動型、ナノ磁性体の磁化過程は一斉磁化回転による反転磁区のニュークリエーションで説明されると考えられる。これは図 2 (a) で単磁区が観察された結果と矛盾せず、実用化に有利な特徴となる。

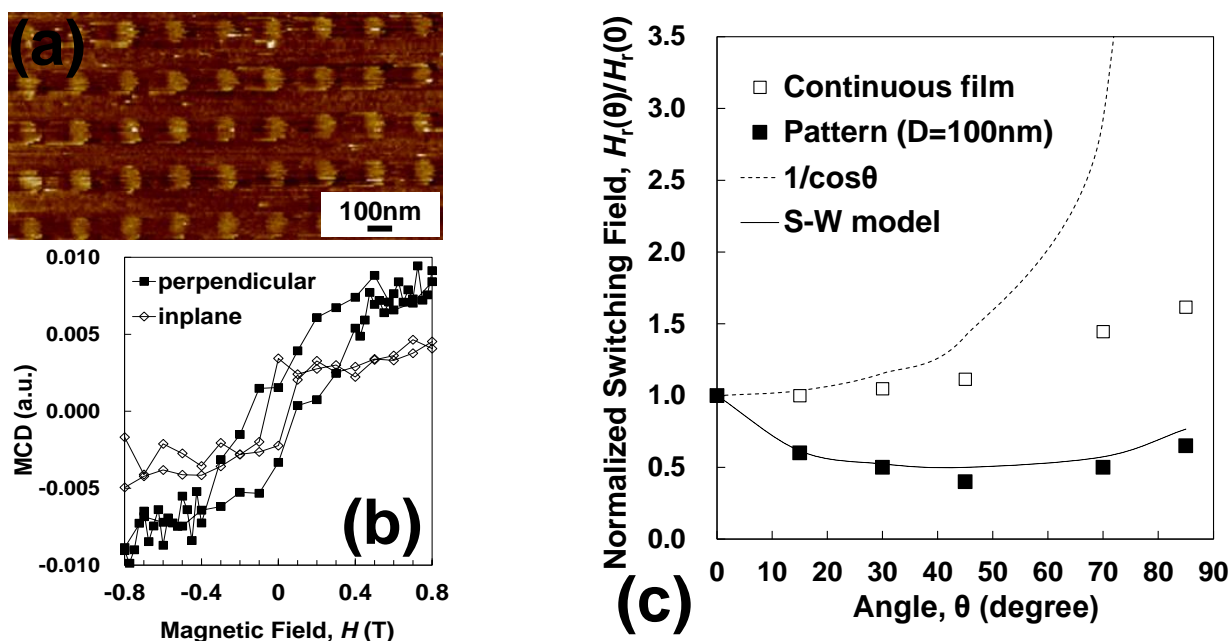


図 2 $L1_0$ -FeMnPt 薄膜への Mn イオン照射により作製したナノ磁性体（直径 $D=100\text{nm}$ ）の室温における (a) MFM 像, (b) 磁化曲線, (c) 磁化反転磁場 (H_r) の角度依存性。

○研究期間全般にわたる感想（写真等があれば添付願います）

私の研究テーマはナノテクを利用した新材料の創製であり、現在はナノスケールに微細加工した磁性体の物性解明と磁気記録媒体への応用に関する研究を行っています。今回留学先に選んだのはイギリスのマンチェスター大学・コンピューターサイエンス学部・ナノエンジニアリング&ストレージテクノロジーリサーチグループです。ここでは世界で初めて記録媒体を搭載した実用的なコンピュータが開発されました。また受入研究室のトーマス・トムソン教授はナノスケール磁性体と磁気記録媒体に関する第一人者であることから、私自身の研究と非常に近く、修行の場として申し分ないと考えました。

留学当初は研究室で個室を与えられましたが、学生やポスドクとの議論・交流を優先し、すぐに大部屋に移動させてもらいました。誰もが海外留学で体感することかもしれませんが、教員と学生との距離感が近い印象を受けました。例えば学生と教授が廊下で会うと、気軽にファーストネームで呼び合い挨拶し、時にはそのままディスカッションに発展します。廊下や庭に長イスが整備されており、学内にカフェも存在し、自然とそこで議論が続きます。私は研究の技術的な面だけでなく、このような文化にも感銘を受けました。また彼らの研究スタイルは、膨大な実験データを出すことなく、ディスカッションの末に考え出した貴重な実験の結果から多角的に考察を行う傾向にありました。図1は私の研究の方向性（次の実験）を話し合っている場面です。事前の議論で一つ一つの実験の意義を明確にしてから取り組む良いクセがつかまりました。私は今回の留学を通し、客観的な視点で自身の研究スタイルを振り返ることができ、研究室運営や学生との接し方についても見直すことができたと思います。

帰国後も交流は続いており、共同研究の形でお互いのサンプル評価やディスカッション等を行っています。また本事業で得られた成果は国際学会と論文の形で発表することができました。末筆になりますが、本件をお認め頂いた材料理工学コース石尾俊二教授、不在時の日常業務を負担して下さった学科教職員の皆様に感謝申し上げます。



図1 ディスカッション風景。左からエリー博士，筆者，トムソン教授，マイル教授。